



### **Science Arts & Métiers (SAM)**

is an open access repository that collects the work of Arts et Métiers Institute of Technology researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in: <https://sam.ensam.eu>  
Handle ID: <http://hdl.handle.net/10985/8960>

#### **To cite this version :**

Eric BECKER, Pierre CEZARD, Stéphane MATHIEU, Régis BIGOT, Laurent LANGLOIS -  
Influence de la vitesse de mise en forme et du cycle de chauffe sur le thixoforgeage des aciers -  
In: 18ème Congrès Français de Mécanique, France, 2007-08-27 - CFM'2007 - 2007

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository

Administrator : [scienceouverte@ensam.eu](mailto:scienceouverte@ensam.eu)



## Influence de la vitesse de mise en forme et du cycle de chauffe sur le thixoforgeage des aciers

Eric BECKER<sup>1</sup>, Pierre CEZARD<sup>1,2</sup>, Stéphane MATHIEU<sup>1</sup>, Régis BIGOT<sup>1</sup>, Laurent LANGLOIS<sup>1</sup>

1 : LGIPM – ENSAM – 4, Rue Augustin Fresnel, 57070 Metz Technopôle – France

2 : ASCOMETAL CREAS - avenue France 57300 Hagondange – France

### Résumé :

*Analyse l'influence de la vitesse du coulisseau et de la température du lopin (fraction liquide) sur le comportement de l'acier à l'état semi-solide en utilisant un nouvel outillage de filage direct monté sur une presse hydraulique. Cette nouvelle conception évite la décélération du vérin rapide pendant la mise en forme. Il permet donc des essais à vitesse constante. Ce travail s'intéresse également à l'écoulement de la matière dans le cas du thixoforgeage de l'acier et montre l'importance d'un couplage entre la température initiale et la vitesse de déformation. Les différentes conditions permettant d'avoir un écoulement homogène et continu, avec un effort de mise en forme faible, sont étudiées et présentées.*

### Abstract :

*This paper analyses the influence of two parameters (tool axis speed and billet temperature) on semi-solid steel alloy behaviour. A new design of direct filling tool is proposed and adapted on hydraulic press. This concept avoids the speed decrease during forming process. This works shows thermal exchange influence in thixoforging process in function speed raw and initial temperature inside the billet by analysis forming loads and part geometries.*

### Mots clefs :

Mise en forme ; Matériaux à haut point de fusion ; Echanges thermiques.

## 1 Introduction

Le thixoforgeage est un procédé de mise en forme à l'état semi-solide exploitant l'évolution de la viscosité du matériau en fonction de la vitesse de déformation appliquée et du temps [1]. Pour les aciers, matériau à haut point de fusion, le thixoforgeage permet d'obtenir un compromis entre les procédés de fonderie et de forge. Les travaux précédents, développés à l'ENSAM de Metz, ont concerné la modélisation du comportement des aciers à l'état semi-solide par une approche micro-macro originale [2-5] et les effets thermiques sur le comportement lors de la mise en forme des aciers [6, 7].

Nous présentons, dans cet article, les résultats de travaux visant à identifier les paramètres influents lors de la mise en forme en thixoforgeage :

- les paramètres du cycle de chauffe par induction,
- la vitesse de l'outillage lors de la mise en forme (filage direct).

## 2 Travaux expérimentaux

### 2.1 Présentation du dispositif expérimental

Les essais se sont déroulés sur une presse hydraulique de 6000 KN (600 tonnes) avec des vitesses de coulisseau pouvant atteindre 1 m/s. Les essais sont réalisés avec un matériau de type C38 ; la température de solidus est de 1380 °C et la température de liquidus est de 1490 °C. Le chauffage des lopins est réalisé par induction.

Les essais réalisés sont des essais de filage direct (Figure 1). Les lopins sont des cylindres de diamètre 38 mm et de hauteur 45 mm extraits d'une barre extrudée. L'opération consiste à réduire le diamètre à 12mm.

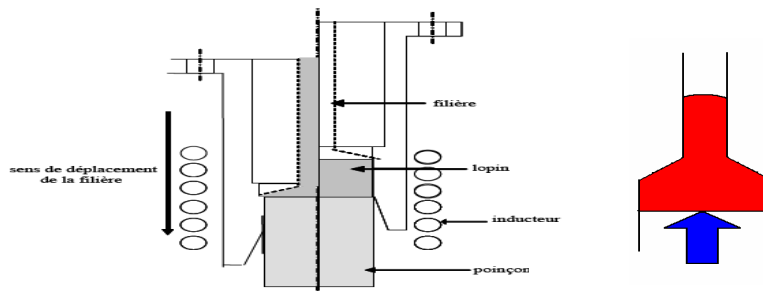


Figure 1 : représentations du principe de l'essai [2]

Les caractéristiques de frottement et d'échange thermique de cette filière sont améliorées en pulvérisant une couche de particule de céramique diminuant le frottement et agissant comme isolant entre l'outil et le lopin chaud [6]. Cet outil actif n'est qu'une partie de l'outillage. Pour obtenir une vitesse constante de mise en forme du lopin (figure 2), nous avons développé un dispositif avec un ensemble d'amortisseurs et de glissières, placé sur le tas inférieur de la machine et soutenant le poinçon de filage (figure 3). Cet outillage « parachute » est composé de deux tubes qui vont se transmettre l'effort et d'un plateau porté par des vérins à gaz. Dès que le tube de l'outil supérieur entre en contact avec le tube de l'outil inférieur le lopin n'est plus déformé et le déplacement correspondant à la décélération est absorbé par les vérins à gaz.

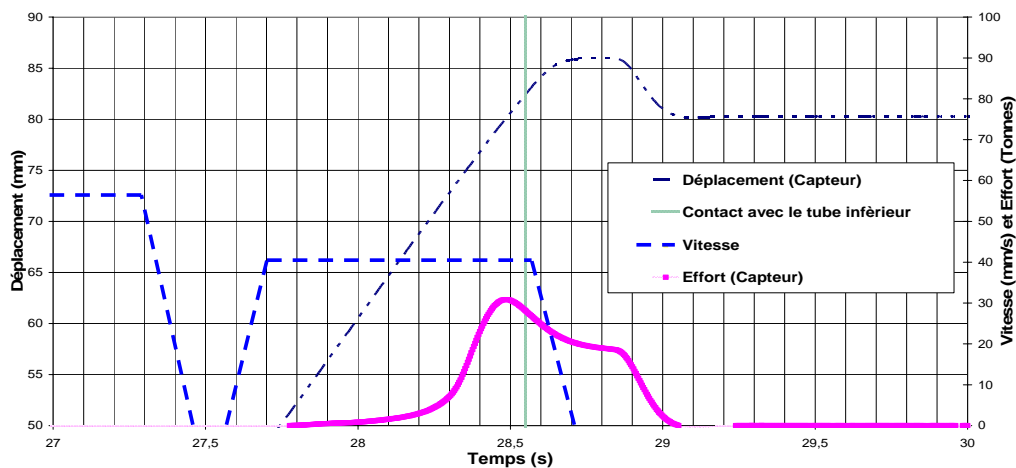


Figure 2 – Exemple d'enregistrement lors d'un essai à 40 mm/s

Le système de chauffe est intégré à l'outillage évitant ainsi le refroidissement de la pièce du à un éventuel transfert.

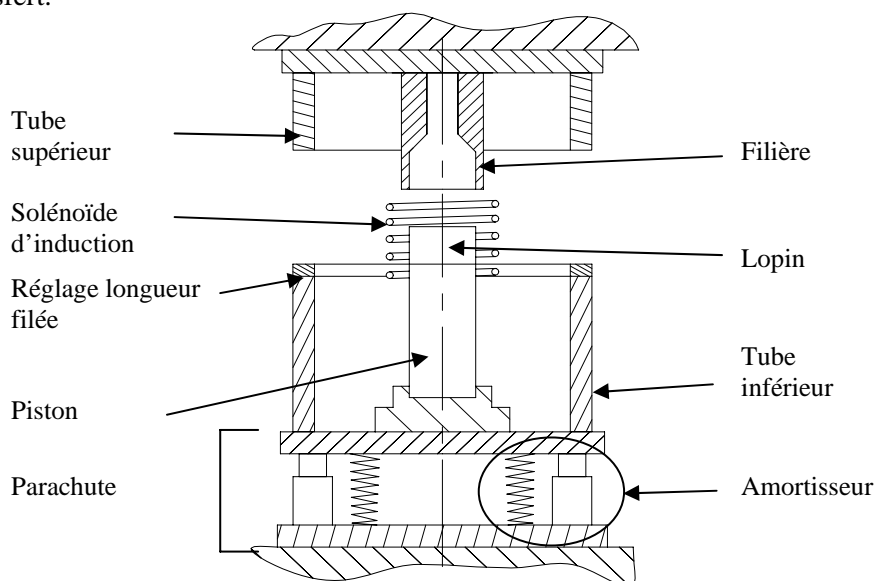


Figure 3 – Schéma du dispositif d'expérimentation

## 2.2 Résultats

Les paramètres étudiés sont : la vitesse de filage et le cycle de chauffe.

Pour chaque essai, l'effort maximal de filage est mesuré et l'aspect de la pièce observé. Chaque essai est réalisé au minimum trois fois pour quantifier la variation des courbes expérimentales (<5%). Ci après, sont représentés les résultats moyens de chaque campagne.

### 2.2.1 Influence de la vitesse de mise en forme

Nous avons effectué des expériences de filage direct à différentes vitesses du coulisseau. Ces vitesses de mise en forme doivent être constantes pour ne pas faire intervenir d'éventuels effets dynamiques et pour avoir des constatations vierges de toute ambiguïté sur la vitesse de filage. Nous avons donc conçu et mis en œuvre le dispositif décrit précédemment.

Un cycle de chauffe de référence noté « long » a été utilisé. Celui-ci porte la température maximale du lopin à 1451°C pour un temps de 241 s. Les vitesses ont été choisies entre 40 mm/s et 215 mm/s. L'effort mesuré lors de ces essais est représenté sur la figure 4.

L'effort de filage diminue avec l'augmentation de la vitesse du coulisseau. Une chute de près de 60% de l'effort maximal est observée entre l'essai à 40mm/s et celui à 215mm/s. Les géométries obtenues sont similaires et classiques d'un filage où la fraction de liquide est trop élevée [6]. Des phénomènes importants d'éjection et de solidification aux parois sont observables (Figure 5). Pour des faibles vitesses, l'écoulement est légèrement plus homogène. Ceci est probablement lié au temps de mise en forme plus long compte tenu de la vitesse faible du coulisseau.

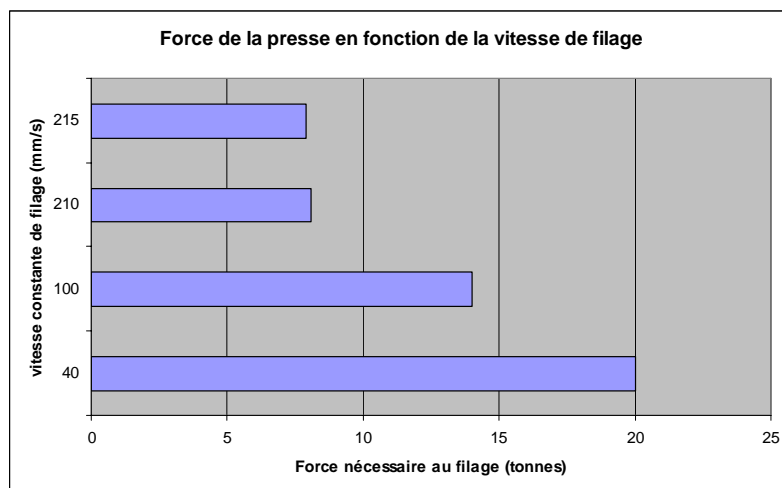


Figure 4 – Effort obtenu en fonction de la vitesse du coulisseau

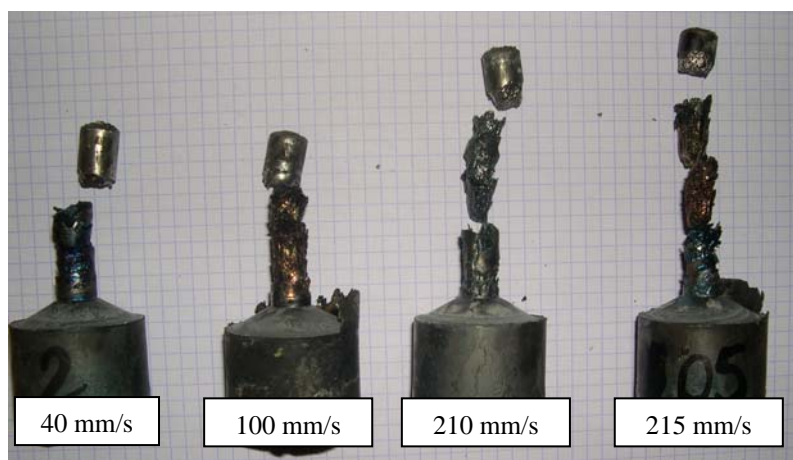


Figure 5 – Pièces obtenues pour différentes vitesses de coulisseau

Ces essais montrent donc une influence claire de la vitesse du coulisseau. Physiquement, cette vitesse va influencer la désagglomération du squelette du semi-solide [2, 8, 9] mais également les échanges thermiques en modifiant le temps de mise en forme [6].

### 3 Influence de la température initiale du lopin et du cycle de chauffe

L'étape suivante consiste à déterminer l'effet du cycle de chauffe par diminution progressive de sa durée. La vitesse de filage retenue est de 215mm/s.

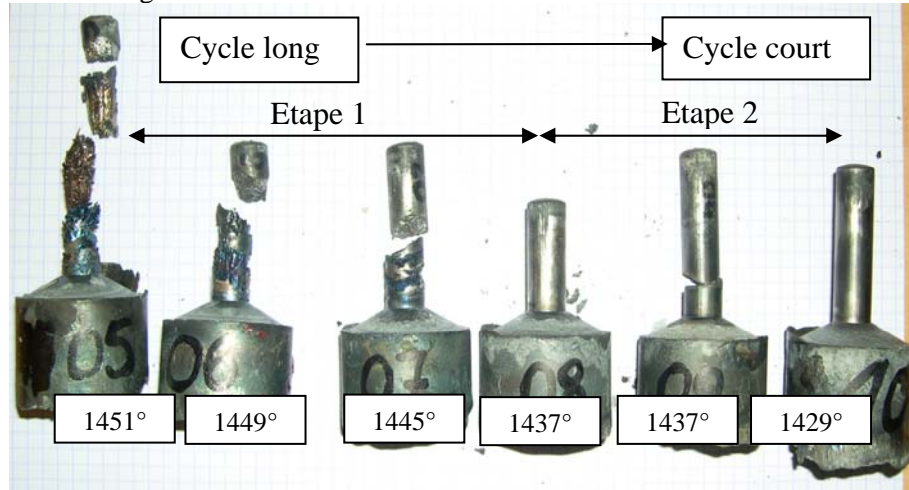


Figure 6 – Pièces obtenues en diminuant le cycle de chauffe.

La figure 6 illustre la stratégie expérimentale. La première étape a consisté à identifier la température optimale pour l'obtention d'un écoulement homogène : dans notre cas 1437 °C (Pièce 8). La seconde étape a permis l'augmentation de la longueur filée (Pièce 9, cassé lors de son extraction). La dernière pièce (n°10) a permis la poursuite de la diminution du temps de cycle pour une longueur importante. Les efforts mesurés sont donnés sur la figure 7.

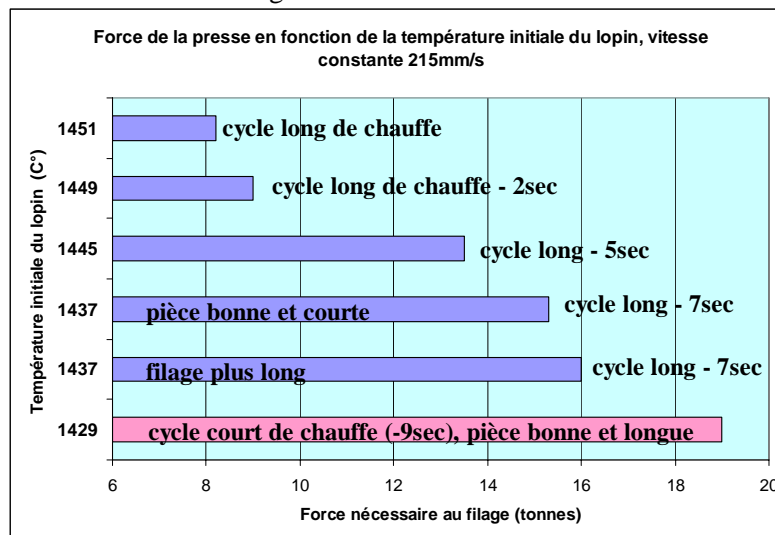


Figure 7 – Effort mesuré en fonction du cycle de chauffe

L'effort augmente avec la diminution de la température de lopin. Ceci s'explique par le fait que la fraction de liquide globale diminue avec la température et génère un effort résultant plus important.

### 4 Discussion

Les efforts développés pour le filage effectué à la vitesse de 215mm/s et à la température initiale de lopin de 1429°C comparés à ceux réalisés à la vitesse de 40mm/s et à la température de 1451 °C sont quasi identiques (Figure 8a). Mais la pièce obtenue avec un lopin à fraction liquide faible et une vitesse de filage élevée possède un écoulement homogène (figure 8b). Dans le cas d'un filage rapide, la fraction solide (ou liquide) évolue moins rapidement puisque la perte de calories est moins élevée

pendant la mise en forme que dans le cas d'un filage à faible vitesse de coulisseau. L'association d'une fraction liquide élevée à une vitesse faible de filage, perte de calories élevées, favorise une solidification rapide des petits volumes de matière éjectés. Cette solidification génère un écoulement hétérogène.

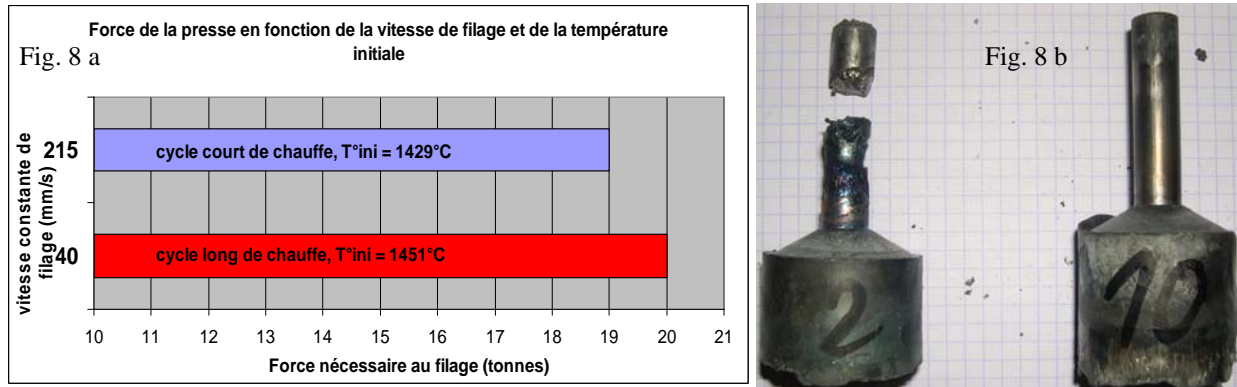


Figure 8 – Comparaison des efforts de filage (a) et des écoulements (b) pour deux cycles de chauffe différents et vitesses différentes

Des essais de filage long à la vitesse de 40mm/s et à la température de 1429°C ont également été réalisés et comparés aux essais de filage de 250mm/s à la même température. La fraction solide étant plus faible, il n'y a plus de phénomène d'essorage même à la vitesse de 40mm/s (figure 9b). L'influence de la vitesse de filage est observable sur la figure 9a. L'effort de mise en forme diminue lorsque la vitesse de filage augmente.

Cela s'explique, en partie, par la diminution de la perte calorifique. La phase liquide ne diminue pas aussi rapidement et la viscosité reste donc faible. L'influence de la vitesse de cisaillement, favorisant la désagglomération du squelette solide, diminue également la viscosité.

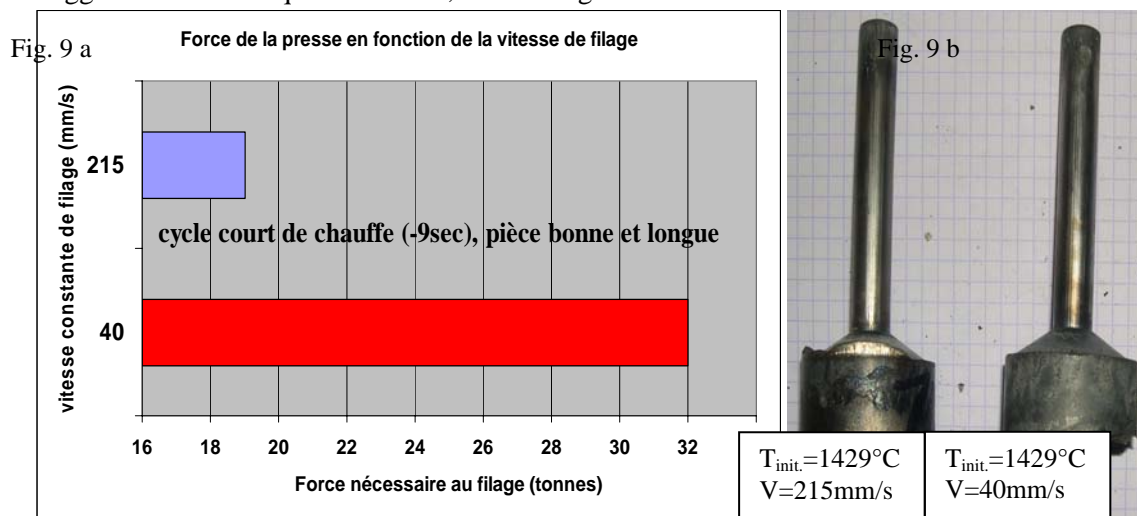


Figure 9 – Efforts mesurés (a) et pièces obtenues (b) pour des essais à 1429°C et à 40mm/s et 250mm/s

L'importance de ces échanges thermiques a également été vérifiée par simulation numérique sous le logiciel Forge 2005®. Ces simulations, figure 10, illustrent l'influence de la vitesse de filage sur l'échange thermique, tous autres paramètres restant constants.

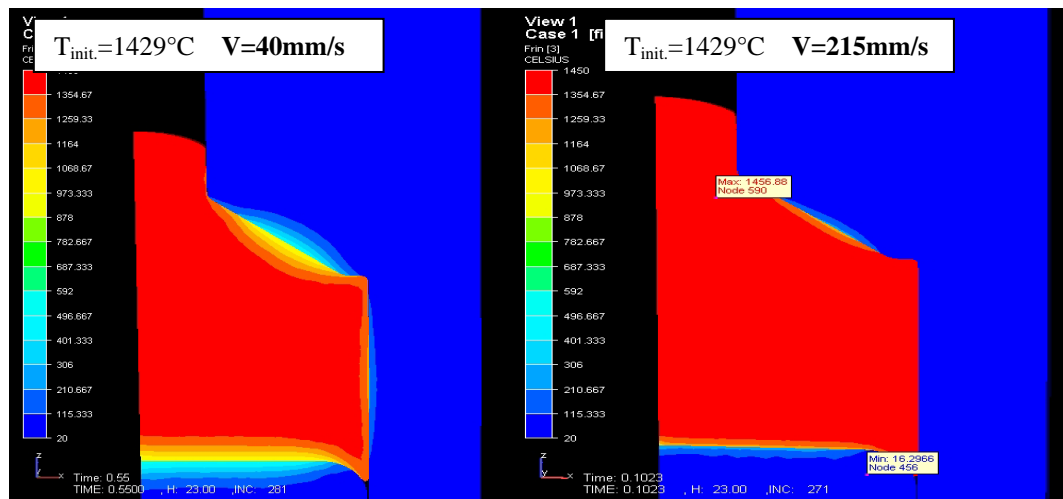


Figure 10 – Influence de la vitesse du coulisseau sur le gradient de température

## 5 Conclusion

Ces résultats illustrent l'impact important de la température et de la vitesse de filage sur les échanges thermiques durant une opération de mise en forme à l'état semi-solide. Ces paramètres ont aussi un impact sur la morphologie de la pièce mise en forme. Les échanges thermiques doivent être limités et maîtrisés pour conserver une fraction de liquide constante et homogène lors de la mise en forme. D'autres approches peuvent être développées pour palier à ces hétérogénéités d'écoulement par la mise en place de lopin cloisonnés [10].

Un compromis entre *vitesse* et *température de mise en forme* peut être déterminé pour avoir un écoulement homogène et un effort faible.

Lors d'une opération de thixoforgeage, la vitesse va agir sur la désagglomération, phénomène mis en évidence dans un grand nombre d'études, mais également sur ces échanges thermiques.

Dans un avenir proche, il faut caractériser ces échanges thermiques à ces températures extrêmes afin de donner une approche quantitative de ces travaux et de proposer un modèle d'interaction outil – matière pour la simulation du thixoforgeage.

## 6 Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier M. Rassili, président de l'action COST 541, pour avoir permis la réalisation d'essais complémentaires sur le site de l'ULg à Liège (Belgique). Leurs remerciements s'adressent également à M. Robelet d'ASCOMETAL – CREAS.

## 7 Références

- [1] P. A. Joly and R. Mehrabian, "The rheology of a partially solid alloy," *Journal of Materials Science*, vol. 11, pp. 1393-1418, 1976.
- [2] C. Rouff, "Contribution à la caractérisation et à la modélisation du comportement d'un acier à l'état semi-solide. Application au thixoforgeage." Metz: ENSAM, 2003.
- [3] P. Cezard, V. Favier, R. Bigot, T. Balan, and M. Berveiller, "Simulation of semi-solid thixoforging using a micro-macro constitutive equation," *Computational Materials Science*, vol. 32, pp. 323-328, 2005.
- [4] V. Favier, C. Rouff, R. Bigot, and M. Berveiller, "Micro-macro modelling of the isothermal steady-state behaviour of semi-solids," *International Journal of Forming Processes*, vol. 7, pp. 177-194, 2004.
- [5] H. V. Atkinson, "Modelling the semisolid processing of metallic alloys," *Progress in Materials Science*, vol. 50, pp. 341-412, 2005.
- [6] P. Cezard, "Caractérisation, Modélisation et Simulation du comportement des alliages métalliques semi-solides. Application au thixoforgeage de l'acier.," in *ENSAM Metz*, 2006.
- [7] R. Bigot, V. Favier, and C. Rouff, "Characterization of semi-solid material mechanical behavior by indentation test," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 160, pp. 43-53, 2005.
- [8] M. Modigell and J. Koke, "Time-dependent rheological properties of semi-solid metal alloys," *Mechanics Time-Dependent Materials*, vol. 3, pp. 15-30, 1999.
- [9] J. Koke and M. Modigell, "Flow behaviour of semi-solid metal alloys," *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, vol. 112, pp. 141-160, 2003.
- [10] H. Shimahara and R. Kopp, "Investigations of basic data for the semi-solid forging of steels," presented at Proceedings of the 8th International Conference on Semi-solid Processing of alloys and composites, Colorado, USA, Limassol, Chypre, 2004, september.